

**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE EN UN  
AEROGENERADOR DOBLEMENTE ALIMENTADO PARA LA  
REDUCCIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA.**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
ELECTRICIDAD**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE EN UN  
AEROGENERADOR DOBLEMENTE ALIMENTADO PARA LA  
REDUCCIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA.**

**AUTOR:  
KEVIN EDISON USIÑA ZHINGRE**

**TUTOR:  
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

**Quito, Noviembre 2021**

Kevin Edison Usiña Zhingre

**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE EN UN AEROGENERADOR  
DOBLEMENTE ALIMENTADO PARA LA REDUCCIÓN DE LA RESONANCIA SUB-  
SÍNCRONA.**

Universidad Politécnica Salesiana  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Kevin Edison Usiña Zhingre** (Y'1994). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Ecuador Patria Mia, se graduó de bachiller en ciencias generales. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el diseño de un filtro activo de corriente en un aerogenerador doblemente alimentado para la reducción de la resonancia sub-síncrona.

[kusinaz@est.ups.edu.ec](mailto:kusinaz@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Manuel Dario Jaramillo Monge** (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

[mjaramillo@ups.edu.ec](mailto:mjaramillo@ups.edu.ec)

**Todos los derechos reservados:**

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo Manuel Dario Jaramillo Monge, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación Diseño de un filtro activo de corriente en un aerogenerador doblemente alimentado para la reducción de la resonancia sub-síncrona realizado por Kevin Edison Usiña Zhingre, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Noviembre de 2021



Manuel Dario Jaramillo Monge

C.I: 1714298005

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Kevin Edison Usiña Zhingre, con documento de identificación N° 1719305300, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: Diseño de un filtro activo de corriente en un aerogenerador doblemente alimentado para la reducción de la resonancia sub-síncrona, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Kevin Edison Usiña Zhingre

C.I: 1719305300

Quito, D.M., Noviembre de 2021

## ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract .....	1
1    Introducción .....	2
2    Marco teórico.....	3
2.1    Redes de distribución .....	3
2.1.1    Generación distribuida.....	3
2.1.2    Micro-red .....	3
2.2    Generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) .....	4
2.2.1    Composición del generador DFIG .....	4
2.2.2    Ventajas del generador DFIG .....	5
2.3    Resonancia sub-síncrona (SSR).....	5
2.3.1    Efecto generador de inducción (IGE) .....	5
2.3.2    Interacción torsional (TI).....	5
2.3.3    Amplificación de par (TA).....	5
2.4    Filtros Activos .....	6
2.4.1    Filtros activos paralelos. ....	6
2.4.2    Filtro activo serie.....	6
2.4.3    Filtros activos conexión serie paralelo. ....	7
3    Planteamiento del Problema.....	7
3.1    Formulación del problema.....	7
3.2    Sistema de Prueba.....	7
3.2.1    Escenario base sistema de distribución IEEE 13 Barras. ....	7
3.2.2    Escenario sistema IEEE 13 barras con generador DFIG. ....	8
3.2.3    Filtro activo de corriente. ....	9
3.3    Casos de Estudio. ....	9
Caso 1: filtro activo con carga estática .....	10
Caso 2: filtro activo con carga dinámica.....	10
Caso 3: filtro activo con carga dinámica balanceada .....	10
Caso 4: filtro activo con carga dinámica desbalanceada.....	10
Caso 5: filtro activo con inflación de carga.....	10
4    Análisis de resultados .....	10
4.1.1    Resultados de filtro activo con carga estática. ....	11
4.1.2    Resultados de filtro activo con carga dinámica. ....	11

4.1.3	Resultados de filtro activo con carga dinámica Balanceada. ....	12
4.1.4	Resultados de filtro activo con carga dinámica Desbalanceada. ....	13
4.1.5	Resultados de filtro activo con inflación de carga. ....	14
5	Conclusiones .....	14
5.1	Trabajos futuros .....	15
6	Referencias.....	15
7	Anexos.....	18
8	Estado del arte .....	21



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de distribución con generación distribuida.....	3
Figura 2. MR modo isla .....	4
Figura 3. MR modo conectado .....	4
Figura 4. Configuración DFIG .....	4
Figura 5. Sistema torsional .....	6
Figura 6. Filtro activo en paralelo .....	6
Figura 7. Filtro activo en serie .....	7
Figura 8. Filtro activo en serie paralelo.....	7
Figura 9. Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.....	8
Figura 10. Perfiles de voltaje por barra del sistema base y el sistema con generación DFIG .....	8
Figura 11. THD de Corriente por cada barra del sistema base y el sistema con DFIG.....	9
Figura 12. Esquema y componentes del filtro activo de corriente.0 .....	9
Figura 13. Ancho de pulso dependiendo de su necesita con respecto al THD de Corriente. ....	9
Figura 14. Aerogenerador DFIG con filtro activo de corriente. ....	9
Figura 15. Diagrama de tiempo para el ingreso de carga. ....	10
Figura 16. THD de corriente por cada barra con carga estática en la barra 2 ....	11
Figura 17. Variación dinámica de THD con carga estática en la barra 2.....	11
Figura 18. THD de corriente por cada barra con carga dinámica en la barra 2..	12
Figura 19. Variación dinámica de THD con carga dinámica en la barra 2. ....	12
Figura 20. Variación dinámica de THD con carga dinámica balanceada de las tres fases en la barra 2. ....	12
Figura 21. Variación dinámica de THD con carga dinámica balanceada en las tres fases en la barra 2. ....	13
Figura 22. THD de corriente por cada barra con carga dinámica desbalanceada en la barra 2. ....	13
Figura 23. Variación dinámica de THD con carga dinámica desbalanceada de las tres fases en la barra 2.....	14

Figura 24. THD de corriente por cada barra para la expansión del sistema base.	14
Figura 25. Variación dinámica de THD de la barra 2 para la expansión del sistema base.	14
Figura 26. Perfiles de voltejes con los diferentes esquemas del filtro.	18
Figura 27. THD de voltaje por cada barra del sistema con los diferentes diseños de filtro.	19
Figura 28. THD de corriente por cada barra del sistema con los diferentes diseños de filtro.	20

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de cargas del Sistema base IEEE. ....	8
Tabla 2. Datos parámetros del aerogenerador DFIG. ....	8
Tabla 3. Niveles de incremento de carga por tiempo. ....	10
Tabla 4. Modificación de carga por tiempo. ....	10
Tabla 5. Datos del ingreso de las cargas ....	10
Tabla 6. Datos de THD de corriente por cada barra caso 1 ....	11
Tabla 7. Datos de THD de corriente por cada barra entre carga estática y carga dinámica. ....	12
Tabla 8. Datos de THD de corriente por cada barra entre carga dinámica balanceada y carga dinámica desbalanceada. ....	13
Tabla 9. Datos de THD de corriente por cada barra cuando hay expansión del sistema caso 5 ....	14

# Diseño de un filtro activo de corriente en un aerogenerador doblemente alimentado para la reducción de la resonancia sub-síncrona.

## Resumen

El nivel de uso de las energías renovables ha crecido notablemente durante las últimas décadas. Lo cual ha generado un impulso en el campo académico y un evidente desarrollo en la tecnología Wind Turbine Generator (WTG). En la que, destaca el desempeño del Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG). Sin embargo, uno de los obstáculos presentados durante su funcionamiento es conocido como: fenómeno de Resonancia Sub-Síncrona (SSR) por sus siglas en inglés, mismo que impide su óptimo desempeño. El problema de SSR se genera por la interacción de intercambio de energía entre la red eléctrica y el DFIG, ya que esta energía se encuentra en el rango inferior de la frecuencia fundamental.

En ese contexto, el presente estudio abarca el diseño de un filtro activo de corriente cuyo objetivo es controlar y mitigar la generación de armónicos (SSR) que se producen en los aerogeneradores DFIG. Para tal efecto, se evalúa el filtro en un sistema de distribución eléctrica IEEE de 13 barras sometido a diferentes modificaciones de carga que se evalúan en cinco casos de estudio.

Finalmente, luego de realizar la evaluación correspondiente del filtro activo de corriente en los diferentes casos de estudio, se obtiene una serie de resultados que confirman el funcionamiento eficaz del filtro, mismo que, genera una disminución de armónicos (SSR) y cumple con los objetivos planteados para el diseño del filtro.

**Palabras Clave:** Generadores de inducción doblemente alimentados, Filtro activo, Análisis armónicos, Modulación de ancho de pulso.

## Abstract

The level of the use of renewable energies has grown remarkably during the last decades. Which has generated a momentum in the academic field and an evident development in Wind Turbine Generator (WTG) technology. In which the performance of the Double Fed Induction Generator (DFIG) stands out. However, one of the obstacles sent during its operation is known as: Sub-Synchronous Resonance (SSR) phenomenon for its acronym in English, preventing its optimal performance.

The SSR problem is generated by the energy exchange interaction between the electrical network and the DFIG, since this energy is in the lower range of the fundamental frequency.

In this context, this study covers the design of an active current filter whose objective is to control and mitigate the generation of harmonics (SSR) that occurs in DFIG wind turbines. For this purpose, the filter is evaluated in an IEEE 13-bar electrical distribution system subjected to different load modifications that are evaluated in five case studies.

Finally, after carrying out the corresponding evaluation of the active current filter in the different study cases, a series of results are obtained and confirm the efficient operation of the filter, which generates a reduction in harmonics (SSR) and meets the objectives raised for filter design.

**Keywords:** Doubly fed induction generator, Active filter, Harmonic analysis, Pulse width modulation.

# 1 Introducción

Uno de los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) es garantizar el acceso a energía confiable y de calidad para todos. En ese marco, la energía renovable cumple un papel fundamental, debido a que puede garantizar la accesibilidad eléctrica en los países más pobres.

El acceso y uso de las energías renovables está vinculado directamente al sector eléctrico, lo cual, ha impulsado significativamente el desarrollo de nuevas tecnologías en los campos de la energía eólica y fotovoltaica [1].

Durante el periodo 2010-2016, el consumo de la energía eólica incrementó en un 18%. El Global Wind Energy Council (GWEC) publicó en el 2021 el informe “Global Wind Energy Outlook”, el cual afirma que la energía eólica podría suministrar el 20% de la electricidad mundial hasta el 2030 [1],[2].

No obstante, en los últimos años se ha visto una disminución del acceso y uso de energía eólica, lo que sugiere un estancamiento de esta tecnología [1].

Ante esta problemática, la implementación de la tecnología DFIG presenta varias ventajas en cuanto a costos de filtro de salida del inversor, pieza encargada de mejorar la eficiencia del sistema y el control del factor de potencia [3]. Por otro lado, se identifica que DFIG presenta problemas de SSR, lo cual deteriora la calidad de energía obtenida.

En ese contexto, el objetivo del presente estudio se centra en mejorar las capacidades de la tecnología DFIG mediante el diseño de un filtro activo de corriente. Para tal efecto, el estudio se estructura de la siguiente manera:

El capítulo 2 contiene el marco teórico, el cual contiene el abordaje conceptual que brinda las bases cognitivas previas para el desarrollo del estudio. Incluye conceptos referidos a las redes de distribución eléctrica, generación distribuida, micro-red con sus tipos de funcionamiento, descripción teórica y grafica sobre la composición del aerogenerador DFIG, los problemas relacionados a la resonancia sub-síncrona, y tipos de filtro activo.

El capítulo 3 contiene tres partes; en primera instancia, se detalla el planteamiento del problema seguido de la descripción del sistema base en donde se integra el aerogenerador DFIG cuyo rol es identificar la presencia del SSR. Adicionalmente, se presenta el diseño del filtro activo de corriente controlado por un ancho de pulso.

Finalmente, se exponen y analizan los casos de estudio en los que especifica el proceso de prueba y evaluación del filtro activo.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de los cinco casos de estudio, precisando ubicaciones de modificaciones de la carga, proceso que permite determinar el porcentaje de armónicos del sistema.

Para verificar la operatividad del filtro activo del sistema se lleva a cabo un análisis de comparación de los resultados de los porcentajes de Total Harmonic Distortion (THD) para cada una de las barras.

Finalmente se identifica el funcionamiento del filtro en la barra más crítica del sistema.

El capítulo 5 expone las conclusiones del estudio y se realiza una reflexión sobre los posibles trabajos futuros que contribuyan al campo de las energías renovables manifestados en base al trabajo actual.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Redes de distribución

Las redes de distribución están formadas por la unión de varios dispositivos y equipos que ocupan un espacio importante en el sistema de potencia (SEP) [4]-[6].

La función primordial de estos sistemas es abastecer de energía a las cargas para satisfacer las necesidades de los usuarios, independientemente de su aplicación, ya sean residenciales, comerciales o industriales [4]-[6].

Los sistemas de distribución comúnmente se usan por la habilidad de operación, la simplicidad a la hora del diseño y el posicionamiento de los equipos de protección [4]-[6].

Los beneficios de la implementación de los sistemas de distribución son: el aumento de confiabilidad y la mejora del medio ambiente gracias a la inclusión de recursos de energía renovable [4]-[6].

Paralelamente, el avance tecnológico y los estudios de los sistemas de distribución han generado sistemas de micro-redes (MR), cuyo rol es el autoabastecimiento de energía con ayuda de la generación distribuida (GD) [4]-[6].

#### 2.1.1 Generación distribuida

La Generación Distribuida (GD) es fundamental para equilibrar los problemas surgidos por la sobredemanda de energía y contrarrestar la degradación del medio ambiente.

En ese marco, la GD representa una solución debido a que su fuente de generación utiliza fuentes de energía renovable y es un componente importante a nivel de distribución, puesto que son equipos de tamaño reducido y pueden ser ubicados cerca de los usuarios finales [7]-[9].

La GD brinda beneficios que apoyan a los usuarios para evitar el corte del

servicio eléctrico y mantener mayor disponibilidad energética. Además, disminuye las pérdidas en las barras del sistema, provocando una mejora en los perfiles de voltaje y reduciendo la contaminación al medio ambiente [9].



Figura 1. Red de distribución con generación distribuida.

#### 2.1.2 Micro-red

La MR es un sistema de distribución con una capacidad por debajo de los 40kV. Estas redes de distribución son pequeñas; y, de acuerdo a su nivel de uso, varía su capacidad y estructura. Las MR se pueden encontrar instaladas en una isla o en industrias para su autoabastecimiento. Además, para mejorar su confiabilidad, este sistema se beneficia de la presencia de GD, debido a su cercanía con la carga, que permite la continuidad del servicio [5],[10],[11].

La MR puede funcionar de dos maneras:

- Modo isla:

La MR está separada del SEP; por lo que, trabaja de forma autónoma. Los generadores deben producir un despacho de energía proporcional a la carga para cubrir la demanda, sin importar el requerimiento de los usuarios. Este sistema de MR se apoya en fuentes de energía renovables como la solar y eólica [10],[12].

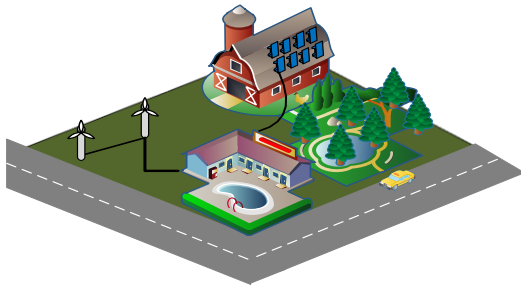


Figura 2. MR modo isla

- **Modo conectado:**

La MR de Modo Conectado se encuentra acoplada al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), en el cual actúa como emisor y receptor de energía. Sin embargo, causa algunas perturbaciones o fenómenos al sincronizarse con el SEP; y, al igual que el modo aislado, se sirve de las fuentes renovables, principalmente, la energía solar y eólica [12].



Figura 3. MR modo conectado

Las MR tienen variadas ventajas como el incremento de la confiabilidad del SEP, evitando, de esta manera, cortes de energía a los usuarios; y, es uno de los pocos sistemas que permite la inclusión del usuario en la interacción con el sistema eléctrico para la generación de su propia energía mediante el uso de fuentes renovables.

En definitiva, la implementación de las MR reduce la contaminación del medio ambiente y disminuye la interrupción del

servicio, debido a que dispone de almacenamiento propio [13],[14].

## 2.2 Generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)

Los generadores DFIG son máquinas eléctricas con movimientos rotativos que permiten la captación del viento para incitar la conversión de la energía mecánica a eléctrica. De acuerdo a Western Electricity Coordinating Council (WECC), los DFIG son del tipo 3 como parte de la clasificación de los aerogeneradores de tipo Centrales Eléctricas [15],[16].

Los DFIG se consideran la máquina eléctrica más usada en todo el mundo, debido a que utiliza energía eólica y provee de importantes ventajas a sus usuarios gracias a sus características [15],[16].

### 2.2.1 Composición del generador DFIG

Los DFIG están equipados con un rotor de bobina, palas del rotor, caja de engranajes, generador de inducción, un rotor bobinado y convertidores electrónicos de potencia como se observa en la Figura 4 [17],[18].

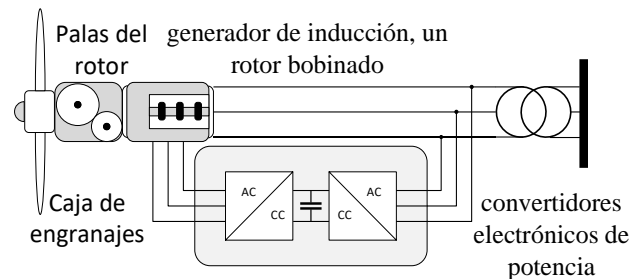


Figura 4. Configuración DFIG

Por lo usual, el estator se encuentra conectado directamente a la red del sistema por sus terminales. Además, el anillo deslizante del rotor está conectado por sus terminales a un convertidor electrónico de potencia dual y un transformador, equipo que

posteriormente ira conectado a la red del sistema [4],[16].

### **2.2.2 Ventajas del generador DFIG**

Entre las ventajas que presenta el uso de la tecnología DFIG, se pueden encontrar: la regulación de velocidad que permite que el generador cree varias velocidades del viento y obtenga el punto máximo de potencia (que se encuentra debajo de la velocidad nominal del viento) con el fin de conseguir mayor cantidad de energía eólica. Este sistema permite obtener mayores beneficios de los recursos eólicos a pesar de las diferentes condiciones climáticas [18],[19].

Otras de las ventajas son: la frecuencia constante, el control despacho de potencia activa y reactiva. Además, de disminuir el ruido y el esfuerzo en los componentes mecánicos [20],[21].

## **2.3 Resonancia sub-síncrona (SSR)**

La SSR es un fenómeno progresivo causado por la interacción del DFIG [22]. Según la IEEE, la SSR es producida por el DFIG, al intercambiar energía con la red eléctrica de potencia. Esto genera oscilaciones torsionales en el generador provocando que las frecuencias mecánicas se alinean con la resonancia del sistema. Este efecto, a su vez, provoca que una o más frecuencias se ubiquen por debajo de la sincronía[23],[24].

Existen tres grupos importantes que presentan problemas en la SSR [23]-[25]:

- Efecto generador de inducción (IGE)
- Interacción torsional (TI)
- Amplificación de par (TA).

### **2.3.1 Efecto generador de inducción (IGE)**

El efecto generador de inducción (IGE) constituye un problema netamente eléctrico. Generalmente causa una autoexcitación del SEP, traducida como una resistencia negativa creada por efecto de la corriente sub-síncrona en aumento que proviene desde el lado del rotor [23]-[27].

Este fenómeno puede ocurrir de dos maneras:

1. Si la resistencia negativa del rotor sobrepasa el total de la resistencia del inducido.
2. Si la resistencia y frecuencia al entorno de la red, provocan una resistencia negativa contra la corriente sub-síncrona [23]-[26].

### **2.3.2 Interacción torsional (TI)**

La TI es un fenómeno de intercambio de energía en donde intervienen, tanto el sistema eléctrico de la red, como el sistema mecánico del generador [23].

Este fenómeno ocurre cuando el torque sub-síncrono se aproxima o se iguala a la frecuencia del eje del generador, provocando oscilaciones en el rotor y por ende en la red del sistema. Como resultado, el rotor del generador empieza a fluir a la velocidad nominal, aunque presenta una frecuencia de perturbación  $f_{per}$ .

Estas oscilaciones ( $f_{per}$ ) provocan en ambos sistemas un voltaje del inducido en donde se encuentran las frecuencias sub-síncronas ( $f_s - f_{per}$ ) y súper-síncronas ( $f_s + f_{per}$ ) [23]-[25].

### **2.3.3 Amplificación de par (TA).**

El amplificador de par (TA) es un fenómeno conocido también como par transitorio o SSR transitorio. TA es un fenómeno producido debido a las perturbaciones del SEP, “como fallas



trifásicas a tierra”. Estas perturbaciones provocan cambios violentos en la corriente generando oscilaciones. Si estas fluctuaciones se aproximan o se igualan a una de las frecuencias del generador, se provoca un incremento en la oscilación. Esto quiere decir que el par es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que fluctúa [23]-[25].

En comparación de IGE y TI, la TA tiene una variación alta en el crecimiento y el torque del generador en el eje puede oscilar y alcanzar un nivel perjudicial en un periodo de tiempo corto [23].

Para el análisis del TA, se requiere un modelo matemático para el sistema mecánico de torsión. Con el objetivo de analizar este sistema de manera integral, es indispensable comprender la acción que produce la flexibilidad de la turbina. Uno de los métodos mecánicos para comprender esta conducta es analizar el modelo de masa de resorte, Figura 5 [24].

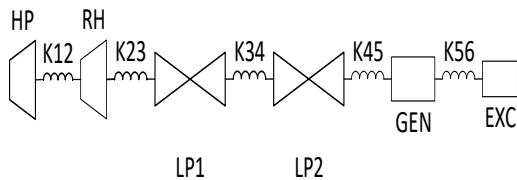


Figura 5. Sistema torsional

Donde:

- $J_i$  Inercia del elemento de rotor de turbina-generador
- $K_{ij}$  Rigidez del eje entre los rotores  $i$  y  $j$

Al analizar la conducta del rotor, se verifica su flexibilidad hacia el par mecánico y compara las diferencias entre la velocidad angular con el par eléctrico, debido a que éstas son conocidas como oscilaciones torsionales [24].

## 2.4 Filtros Activos

Un filtro activo es un equipo de electrónica de potencia con la función principal de generar varias soluciones; de tal manera que, pueda compensar de forma dinámica la potencia reactiva, los desbalances y la distorsión armónica. Esto significa que la solución dinámica se ajusta a las necesidades de la señal de compensación [28],[29].

Los filtros activos se pueden clasificar como series o paralelo y es posible encontrar en algunos sistemas de acondicionamiento una combinación de las dos [28],[29].

### 2.4.1 Filtros activos paralelos.

Los filtros activos paralelos facilitan la compensación de la potencia reactiva provocando una mejora en el factor de potencia, balancea corrientes y amortigua (o elimina) armónicos presentes en la red eléctrica [28],[29].

La ventaja de la utilización de un filtro activo es que provee exclusivamente la corriente de compensación, conjuntamente de una corriente activa para desagaviar las pérdidas [29].

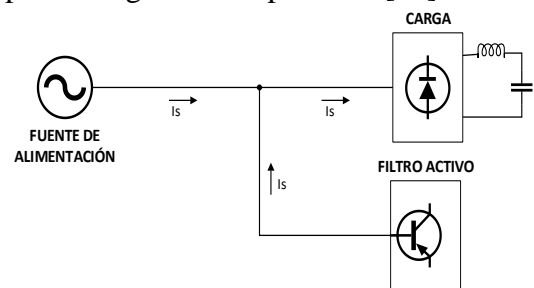


Figura 6. Filtro activo en paralelo

### 2.4.2 Filtro activo serie.

Los filtros activos serie permiten disminuir armónicos de tensión presentes en la red. Además, compensan las caídas de tensión, lo que provoca una mejora de señal de voltaje en el punto de conexión [28],[29].

La ventaja al utilizar este tipo de filtros activos en serie es que permite balancear las tensiones del sistema y a la

eliminación específica de armónicos de tensión [29].

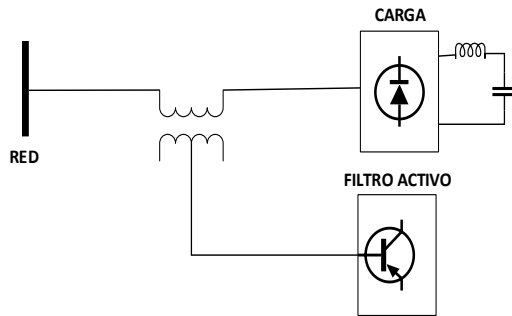


Figura 7. Filtro activo en serie

#### 2.4.3 Filtros activos conexión serie paralelo.

Estos tipos de filtros combinados por serie y paralelo son también conocidos como filtros activos universales, estos filtros obtienen ventajas al adquirir los beneficios de los dos tipos. No obstante, el uso de este tipo es limitado por la complejidad en el control y por su costo elevado[29],[30].

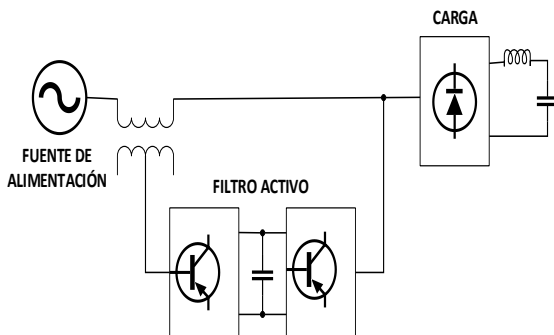


Figura 8. Filtro activo en serie paralelo

La configuración del convertidor del filtro activo depende del sistema en el cual está siendo empleado como el número de fases, debido a que puede ser monofásico, bifásico o trifásico, y de esto dependerá cómo se encuentre el convertidor [29],[30].

## 3 Planteamiento del Problema

### 3.1 Formulación del problema

Debido a los problemas producidos por los aerogeneradores DFIG, conocidos como el fenómeno de SSR que genera limitaciones en los diferentes tipos de red eléctrica de potencia, surge la necesidad de diseñar un filtro activo de corriente para la mitigación de armónico causado por la SSR en las señales de corriente.

Para tal efecto, se realiza una simulación en el software simulink (Matlab), que permite representar el sistema IEEE de 13 barras e implementar el aerogenerador DFIG con el fin de comprobar la presencia de SSR en cada barra del sistema. Finalmente, se procede al diseño del filtro para la disminución de armónicos.

### 3.2 Sistema de Prueba.

En esta sección se presenta los escenarios empleados para la evaluación del comportamiento del filtro activo. Como base del estudio se trabaja con el sistema de distribución IEEE de 13 barras.

#### 3.2.1 Escenario base sistema de distribución IEEE 13 Barras.

El sistema de distribución IEEE de 13 barras cuenta con singularidades muy interesantes; el nivel de voltaje nominal de la red es de 24.9kV. Este sistema está diseñado para evaluar las señales de onda de sistemas trifásicos y está conformado por 13 barras que están interconectadas por 12 líneas aéreas, una unidad de generación y cargas puntuales.

En primera instancia, el sistema IEEE de 13 barras se encuentra representado en la figura 9 y sus cargas se indican en la tabla 1 [31].

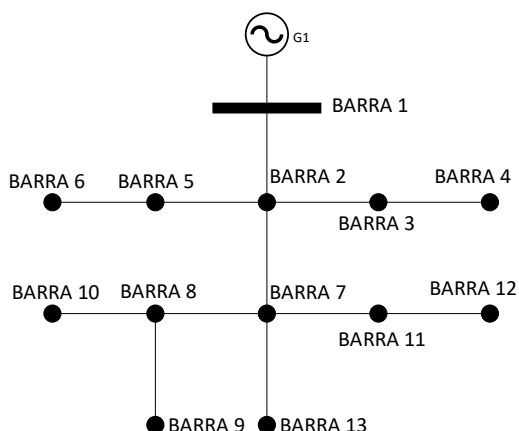


Figura 9. Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.

Tabla 1. Datos de cargas del Sistema ba.se IEEE.

Nº Barras	Pc [MW]	Qc [MVAr]
1	0	0
2	3	0,12
3	0	0
4	6	0,29
5	2,55	0,12
6	3	0,12
7	17,25	0,66
8	0	0
9	1,65	0,07
10	2,4	0,07
11	0	0
12	0	0
13	0	0

### 3.2.2 Escenario sistema IEEE 13 barras con generador DFIG.

El aerogenerador DFIG es fundamental para la inserción de la SSR en el sistema. Para lo cual, es necesario realizar el análisis de THD.

Para el ingreso del aerogenerador al sistema, se toma en cuenta los niveles de voltaje expresados en su valor efectivo o valor Raíz Media Cuadrática (RMS) de cada barra.

Se realiza una búsqueda exhaustiva en cada barra del sistema para localizar la ubicación óptima del aerogenerador, tomando en cuenta el valor de voltaje RMS y THD de corriente. Como resultado, la mejor ubicación se encuentra en la barra 3 del sistema debido a que presenta un bajo nivel de voltaje RMS y un alto nivel de corriente THD.

Por defecto, el aerogenerador DFIG toma los parámetros presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Datos parámetros del aerogenerador DFIG.

Potencia nominal	1.5 [MW]
Voltaje nominal del estator	690 [V]
Voltaje nominal del rotor	1725 [V]
Frecuencia	60 [Hz]
Resistencia del estator	0,023 [p.u.]
Inductancia del estator	0,18 [p.u.]
Resistencia del rotor	0,016 [p.u.]
Inductancia del rotor	0,01 [p.u.]
Inductancia de magnetización	2.9 [p.u.]
Contante de inercia	0,685

Al ingresar el aerogenerador DFIG en el sistema, se comprueba la presencia de cambios, tanto en los niveles de voltaje, como en los niveles de THD.

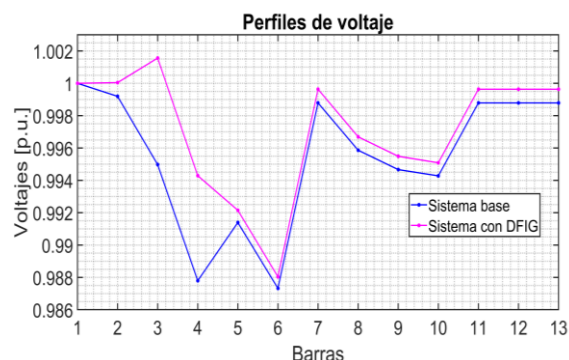


Figura 10. Perfiles de voltaje por barra del sistema base y el sistema con generación DFIG

En la figura 11 se puede ver el aumento de THD en cada una de las barras del sistema de manera significativa, por el acoplamiento del aerogenerador DFIG.

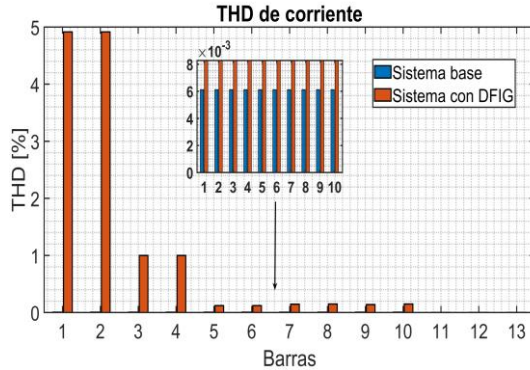


Figura 11. THD de Corriente por cada barra del sistema base y el sistema con DFIG.

### 3.2.3 Filtro activo de corriente.

Para el diseño de filtro activo de corriente, se toma en consideración la electrónica de potencia, debido a que el diseño consta de tiristores conectados a una carga RLC inducidas por una onda cuadrada controlada.

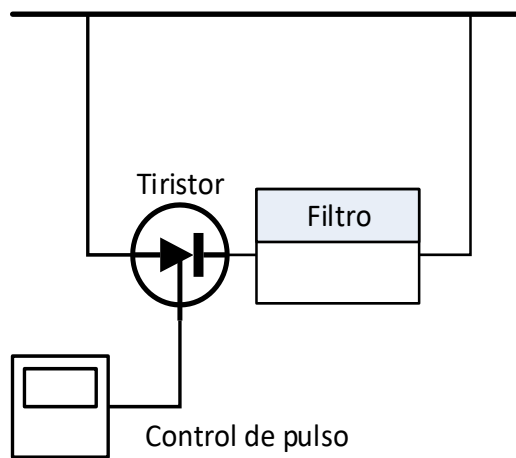


Figura 12. Esquema y componentes del filtro activo de corriente.

El control del ancho de pulso es realizado por el THD de corriente de la barra más crítica (barra 2).

Este control hace que el ancho de la onda varíe según la necesidad requerida de THD y de ese modo se adapte a la señal conforme a la necesidad de la dinámica de THD.

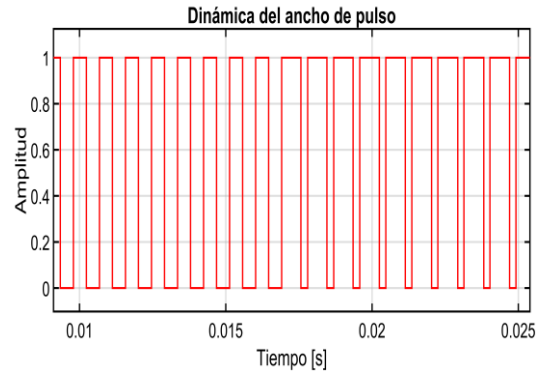


Figura 13. Ancho de pulso dependiendo de su necesidad con respecto al THD de Corriente.

Para el mejor diseño del filtro activo de corriente, se consideró los diferentes esquemas del filtro tales como: en serie y paralelo.

El resultado obtenido posterior al diseño del filtro activo de corriente demuestra que el filtro en serie disminuye los armónicos en gran cantidad en comparación con el filtro en paralelo. Por consiguiente, se procede a ubicar el filtro activo de corriente entre el transformador y el aerogenerador DFIG. Como se indica en la Figura 14.

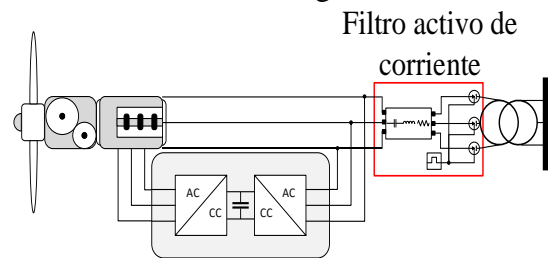


Figura 14. Aerogenerador DFIG con filtro activo de corriente.

### 3.3 Casos de Estudio.

Los casos de estudio tienen como objetivo verificar la operatividad del filtro activo de corriente seleccionado.

El filtro activo es puesto a prueba en los diferentes casos de estudio, en los cuales la carga puede obtener un comportamiento aleatorio. Los casos presentan cambios en la barra 2, debido a que presentan un alto índice de THD de corriente y es la más crítica para el sistema.

### Caso 1: filtro activo con carga estática

Para el caso 1, se busca evaluar el comportamiento del filtro activo con las diferentes cargas del sistema inicial (mantiene cargas balanceadas). El filtro se pone a prueba mediante su interacción con los diferentes niveles de armónicos de corriente de la barra 2.

### Caso 2: filtro activo con carga dinámica

En este caso se realiza modificaciones en la barra 2. La misma que consta de una potencia activa de 3MW. Con el fin de observar cómo actúa el filtro, se incrementa un 5% de su potencia activa en intervalos de tiempo como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Niveles de incremento de carga por tiempo.

Tiempo [s]	Rangos de Incremento [%]	Pc [MW]
0.5	5	0.15
0.7	10	0.3
0.9	15	0.45

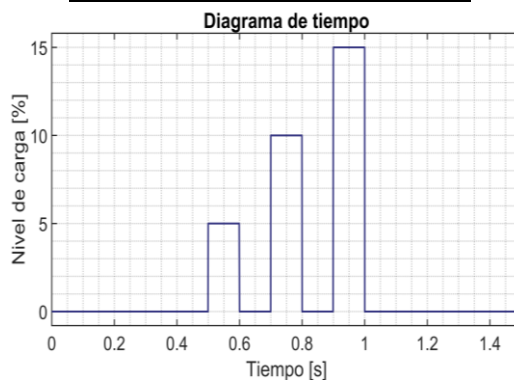


Figura 15. Diagrama de tiempo para el ingreso de carga.

### Caso 3: filtro activo con carga dinámica balanceada

Para el caso 3, se analiza el comportamiento del filtro en las tres fases del sistema con las cargas balanceadas en donde se incrementará de igual manera un 5 % de su potencia activa en cada una de las fases.

### Caso 4: filtro activo con carga dinámica desbalanceada.

En este caso, se pone a prueba la habilidad del filtro activo frente a la dinámica de la carga desbalanceada. Se incrementa las cargas en un 5%. Sin embargo, se desbalancea individualmente como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4. Modificación de carga por tiempo.

Tiempo [s]	Rangos de Incremento [%]	P [MW]		
		Fase a	Fase b	Fase c
0	0	3	4.8	5.4
0.5	5	0.15	0.24	0.27
0.7	10	0.3	0.48	0.54
0.9	15	0.45	0.72	0.81

### Caso 5: filtro activo con inflación de carga.

Para el caso 5, el sistema base se modifica por el ingreso de cargas, estas cargas se ubicarán en las barras 11, 12 y 13.

Esto permite saber cómo se comporta el filtro al ingresar nuevas cargas o en el caso de que cualquier sistema se amplíe por la demanda.

Los datos de las cargas se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Datos del ingreso de las cargas

Nº Barras	Pc [MW]	Qc [MVar]
11	2,55	0.12
12	3	0.12
13	2	0.08

## 4 Análisis de resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los diferentes casos de estudio presentados anteriormente.

#### 4.1.1 Resultados de filtro activo con carga estática.

Los resultados obtenidos del análisis de THD del sistema base y el sistema con filtro activo de corriente para cada barra se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Datos de THD de corriente por cada barra caso 1

N° Barras	THD [%]		
	Sistema base	Sistema con DFIF	Sistema con filtro
1	0,006	4,914	0,076
2	0,006	4,914	0,076
3	0,006	1,000	0,067
4	0,006	1,000	0,067
5	0,006	0,122	0,062
6	0,006	0,122	0,062
7	0,006	0,148	0,081
8	0,006	0,150	0,083
9	0,006	0,141	0,075
10	0,006	0,150	0,083
11	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000

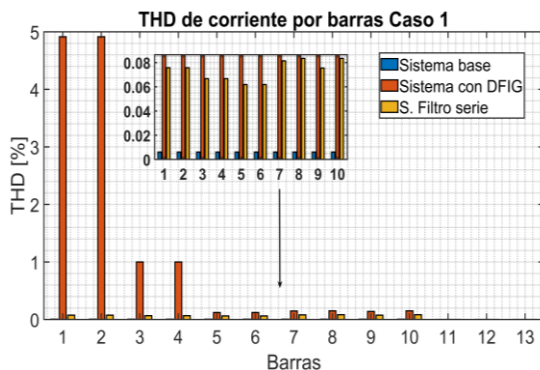


Figura 16. THD de corriente por cada barra con carga estática en la barra 2

Los resultados obtenidos son muy satisfactorios, debido a que el filtro implantado afecta a todo el sistema, disminuyendo el THD de cada barra.

Este cambio deja al sistema con un promedio de 0,073 % de THD. A pesar de no dejar un THD similar como en el caso base, este resultado es adecuado, debido a que se encuentran por debajo del 1 % de THD.

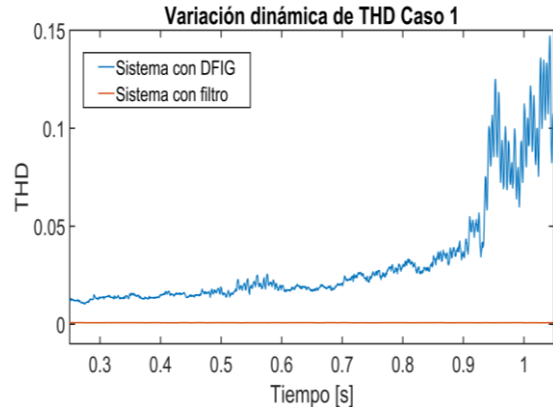


Figura 17. Variación dinámica de THD con carga estática en la barra 2.

El resultado de THD en la barra 2 presenta una disminución. Además, se puede constatar cómo actúa el filtro conforme se presentan los niveles de THD para dejarlos en un promedio del 0.075 % de todo el sistema, independientemente de si este valor es bajo como 1 % o tan alto como 14 % de estos resultados.

#### 4.1.2 Resultados de filtro activo con carga dinámica.

El resultado obtenido en la inclusión de carga dinámica en la barra 2, se presenta en la tabla 7. Estos resultados indican un pequeño porcentaje de disminución de THD en relación con el caso anterior (0.184 % en las barras 1 y 2 del sistema sin el filtro).

Este porcentaje de disminución de THD hace que el filtro trabaje con un ancho de pulso menor, lo que provoca que el filtro disminuya su reducción de THD.

El porcentaje de THD de carga estática es menor que el porcentaje de THD de carga dinámica dejando una diferencia de 0.01 %.

No obstante, la reducción de THD es muy conveniente, debido a que al igual que el anterior caso se encuentra por debajo del 1%.

Tabla 7. Datos de THD de corriente por cada barra entre carga estática y carga dinámica.

N° Barras	THD [%]			
	Sistema carga estática Caso 1	Sistema carga dinámica Caso 2	Sistema con filtro Caso 1	Sistema con filtro Caso 2
1	4,914	4,730	0,076	0,086
2	4,914	4,730	0,076	0,086
3	1,000	1,005	0,067	0,067
4	1,000	1,005	0,067	0,067
5	0,122	0,122	0,062	0,062
6	0,122	0,122	0,062	0,062
7	0,148	0,148	0,081	0,081
8	0,150	0,151	0,083	0,083
9	0,141	0,141	0,075	0,075
10	0,150	0,151	0,083	0,083
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000

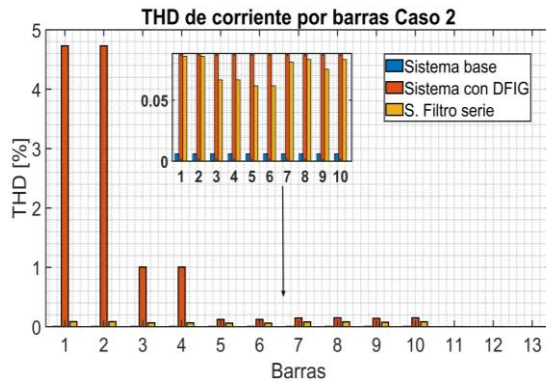


Figura 18. THD de corriente por cada barra con carga dinámica en la barra 2.

El THD en la barra 2, tiene un promedio de 0.075 % de THD gracias a la ayuda del filtro activo. Sin embargo, si bien es cierto que el filtro reduce el THD, se encuentran unos picos que van desde 0.16 % hasta 0.35 % de THD y se presentan a causa del ingreso de un nuevo porcentaje de la carga en su

determinado tiempo indicados en la tabla 3.

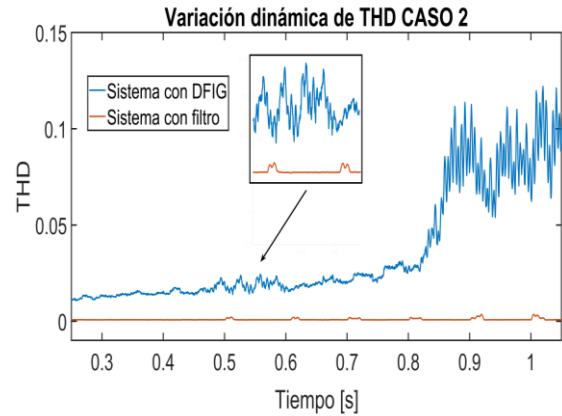


Figura 19. Variación dinámica de THD con carga dinámica en la barra 2.

#### 4.1.3 Resultados de filtro activo con carga dinámica Balanceada.

Realizando el análisis de THD en las tres fases balanceadas de la barra 2 se puede ver que existe un desbalance por el ingreso del aerogenerador DFIG y por el incremento de las cargas.

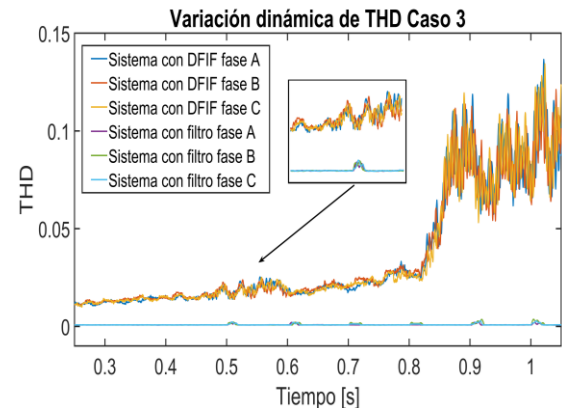


Figura 20. Variación dinámica de THD con carga dinámica balanceada de las tres fases en la barra 2.

En la figura 21 se observa un desbalance en la señal variación de THD del filtro activo de corriente en el instante que se incrementa la carga. Los picos varían dependiendo de la carga aumentada en cada una de sus fases.

El resultado obtenido al incrementar un 5 por ciento de la carga de la barra 2, deja un THD máximo de 0.22 % para la fase C, dejando un mínimo de 0.19 % para la fase A. Por otro lado, el resultado



obtenido al incrementar un 15 %, nos deja un THD máximo de 0.36 % para la fase B, dejando un mínimo de 0.19 % para la fase A.

Mientras más sea el incremento de carga en el instante de tiempo especificado, mayor se verá afectado el desbalance y pico de THD del filtro.

El resultado del filtro activo de corriente frente a una carga dinámica balanceada es beneficioso. A pesar de existir picos por el aumento de carga, se encuentra en un rango que no sobre pasa el 1 % de THD.

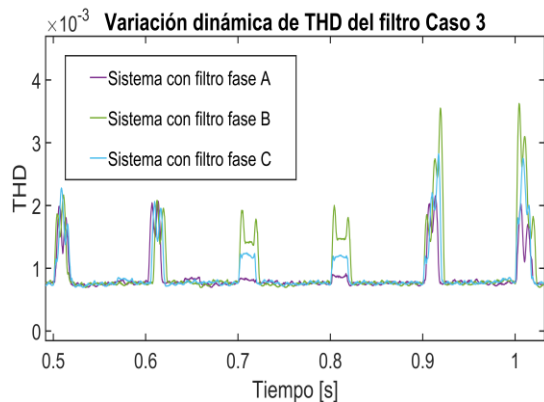


Figura 21. Variación dinámica de THD con carga dinámica balanceada en las tres fases en la barra 2.

#### 4.1.4 Resultados de filtro activo con carga dinámica Desbalanceada.

El ingreso de cargas dinámicas desbalanceadas al sistema, da como resultado lo siguiente:

En la barra 1-2 disminuye en 0,225 % y en la barra 3-4 disminuye en 0,011 %, mientras que en las otras barras se reducen en un 0,001 % de THD.

El resultado de THD del filtro activo, al igual que en el caso 3, se reduce el THD. Por lo que, el control de la onda hace que se disminuya el ancho de pulso, dando así un pequeño porcentaje de incremento de THD.

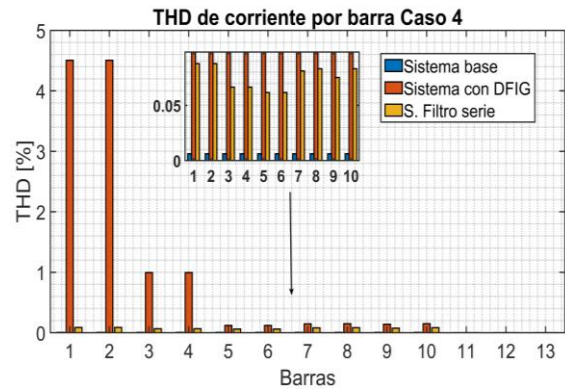


Figura 22. THD de corriente por cada barra con carga dinámica desbalanceada en la barra 2.

Tabla 8. Datos de THD de corriente por cada barra entre carga dinámica balanceada y carga dinámica desbalanceada.

N° Barras	THD [%]			
	Sistema carga estática Caso 2	Sistema carga dinámica Caso 4	Sistema con filtro Caso 2	Sistema con filtro Caso 4
1	4,730	4,505	0,086	0,088
2	4,730	4,505	0,086	0,088
3	1,005	0,994	0,067	0,067
4	1,005	0,994	0,067	0,067
5	0,122	0,121	0,062	0,062
6	0,122	0,121	0,062	0,062
7	0,148	0,147	0,081	0,081
8	0,151	0,149	0,083	0,083
9	0,141	0,140	0,075	0,075
10	0,151	0,149	0,083	0,083
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000

En este caso, el desbalance es más visible cuando aumenta la carga desbalanceada. Existen pequeños picos de igual forma por el ingreso de nueva carga; sin embargo, estos picos y desbalances no tienen alta durabilidad. El filtro provoca que llegue a estabilizarse en 0.01 a 0.02 segundos después de haber ingresado la carga como se indica en la figura 26.



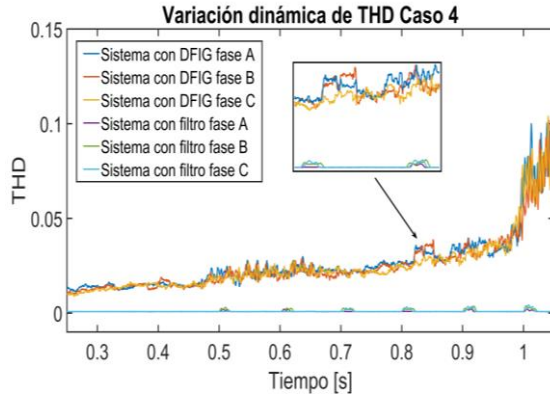


Figura 23. Variación dinámica de THD con carga dinámica desbalanceada de las tres fases en la barra 2

#### 4.1.5 Resultados de filtro activo con inflación de carga.

El resultado obtenido del ingreso de cargas en cada una de las barras especificadas en la tabla 5 demuestra que el filtro tiene el mismo comportamiento dejando a todas las barras con un promedio de 0.075 % de THD.

Tabla 9. Datos de THD de corriente por cada barra cuando hay expansión del sistema caso 5

N° Barras	THD [%]		
	Sistema base	Sistema con DFIF	Sistema con filtro
1	0,006	4,498	0,075
2	0,006	4,498	0,075
3	0,006	1,002	0,066
4	0,006	1,002	0,066
5	0,006	0,120	0,061
6	0,006	0,120	0,061
7	0,006	0,143	0,079
8	0,006	0,147	0,082
9	0,006	0,138	0,075
10	0,006	0,147	0,082
11	0,000	0,137	0,073
12	0,000	0,139	0,075
13	0,000	0,142	0,078

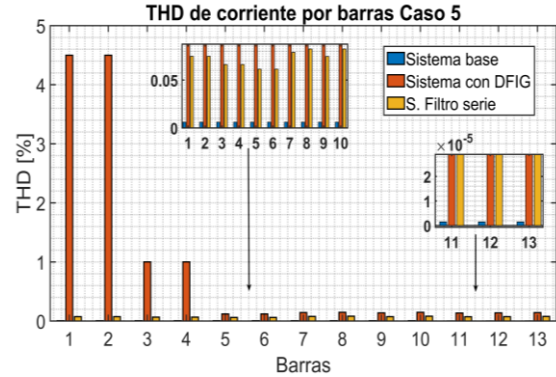


Figura 24. THD de corriente por cada barra para la expansión del sistema base.

En la figura 25, se puede ver que el aerogenerador DFIG provoca altos porcentajes de armónicos y desbalances por fase. Aunque estos desfases son menores al caso anterior son muy perjudiciales. No obstante, debido a la implementación del filtro, las fases se regulan hasta obtener un promedio aceptable de THD.

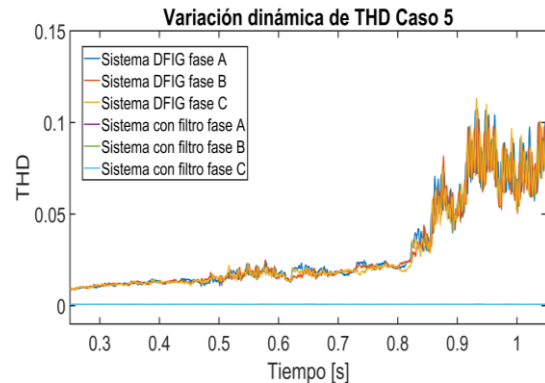


Figura 25. Variación dinámica de THD de la barra 2 para la expansión del sistema base.

## 5 Conclusiones

Luego de realizar la evaluación del filtro activo de corriente en los diferentes casos descritos, y sobre todo después de una visión clara de los resultados se concluye lo siguiente:

- Al evaluar el filtro activo de corriente, se verifica su funcionalidad, debido a que mitiga los armónicos (SSR) hasta un 99 %.
- Para la evaluación de incremento de carga dinámica en el sistema de

distribución con DFIG, se debe tomar en cuenta que existen unos leves desbalances de THD. No obstante, su estabilización es relativamente rápida (0.02 segundos después de haber ocurrido el evento).

- El filtro activo genera la disminución de armónicos de cualquier orden y regula los desfases que existen por el THD, dejando una disminución de desfase del 98%.
- La función de control de onda, tiene un margen que varía desde el 50 % hasta el 99 % del ancho de pulso, esto provoca que el filtro regule al sistema hasta equilibrarlo con un promedio de 0.075% de THD.
- La confiabilidad que brinda el filtro activo de corriente frente a los diferentes escenarios es alta, e, independientemente del comportamiento de la demanda (ya sea que esta incremente o, no), el filtro funciona sin complicaciones.

## 5.1 Trabajos futuros

El resultado en este estudio sirve como base para los nuevos diseños de filtros activos y otras maneras de control para mitigar la SSR como:

- La implementación de diseño de filtros activos con esquemas en serie y paralelo.
- El control de THD de corriente y voltaje para el ancho de pulso de cada fase.

## 6 Referencias

- [1] “- Indicadores de los ODS.” <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-07/> (accessed Jun. 13, 2021).
- [2] “About us | Global Wind Energy Council.” <https://gwec.net/> (accessed Jun. 13, 2021).
- [3] J. M. G. Alvarez and J. C. G. Targarona, “Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia,” *DYNA*, vol. 78, no. 169, pp. 95–104, 2011.
- [4] S. M. Torabi, “Fault location and classification in distribution systems using clark transformation and neural network,” *16th Electr. Power Distrib. Conf. EPDC 2011*, pp. 1–8, 2011.
- [5] K. R. Padiyar and A. M. Kulkarni, “Dynamics and Control of Electric Transmission and Microgrids,” *Dyn. Control Electr. Transm. Microgrids*, 2019, doi: 10.1002/9781119173410.
- [6] J. H. F. Asipuela, “Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida en sistemas de distribución utilizando técnicas heurísticas basadas en escenarios de demanda.” 2020, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18999/1/UPS-TTS058.pdf>.
- [7] S. J. Huang, C. W. Hsieh, and H. H. Wan, “Confirming the permissible capacity of distributed generation for grid-connected distribution feeders,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 540–541, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2326985.
- [8] Y. Tan and Z. Wang, “Incorporating unbalanced operation constraints of three-phase distributed generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 2449–2452, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2895559.
- [9] F. G. K. Guarda, G. C. Junior,

- and C. D. L. Da Silva, "Fault current limiter placement to reduce recloser-fuse miscoordination in electric distribution systems with distributed generation using multiobjective particle swarm optimization," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 7, pp. 1914–1920, 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8447357.
- [10] B. Liu, F. Zhuo, Y. Zhu, and H. Yi, "System Operation and Energy Management of a Renewable Energy-Based DC Micro-Grid for High Penetration Depth Application," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1147–1155, 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2374163.
- [11] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, "Role of Outage Management Strategy in Reliability Performance of Multi-Microgrid Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 2359–2369, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2746180.
- [12] I. Askarian, S. Eren, M. Pahlevani, and A. M. Knight, "Digital real-time harmonic estimator for power converters in future micro-grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6398–6407, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2711016.
- [13] M. Song *et al.*, "100 kJ/50 kW HTS SMES for Micro-Grid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, 2015, doi: 10.1109/TASC.2014.2386345.
- [14] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2066534.
- [15] F. M. Gebreu, B. Khan, and H. H. Alhelou, "Analyzing low voltage ride through capability of doubly fed induction generator based wind turbine," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 86, p. 106727, 2020, doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106727.
- [16] P. K. Gayen, "Magnetizing current based improved rotor position and speed estimation of doubly-fed induction generator using model reference adaptive scheme," *Measurement*, no. April, p. 108602, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108602.
- [17] S. Soued, H. S. Ramadan, and M. Becherif, "Effect of doubly fed induction generator on transient stability analysis under fault conditions," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 315–324, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.033.
- [18] P. Mukherjee and V. V. Rao, "Effective location of SMES for power fluctuation mitigation of grid connected doubly fed induction generator," *J. Energy Storage*, vol. 29, no. October 2019, p. 101369, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101369.
- [19] H. Jenkal, B. Bossoufi, A. Boulezhar, A. Lilane, and S. Hariss, "Vector control of a doubly fed induction generator wind turbine," *Mater. Today Proc.*, vol. 30, pp. 976–980, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.360.
- [20] B. Kelkoul and A. Boumediene, "Stability analysis and study between classical sliding mode

- control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine,” *Energy*, vol. 214, p. 118871, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118871.
- [21] H. Li *et al.*, “Improved identification method of doubly-fed induction generator based on trajectory sensitivity analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 125, no. August 2020, p. 106472, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106472.
- [22] X. Xie, X. Zhang, H. Liu, H. Liu, Y. Li, and C. Zhang, “Characteristic Analysis of Subsynchronous Resonance in Practical Wind Farms Connected to Series-Compensated Transmissions,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 3, pp. 1117–1126, 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2676024.
- [23] S. Chernet, “Subsynchronous Resonance in Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Farms,” 2016.
- [24] H. Ghasemi, G. B. Gharehpetian, S. A. Nabavi-Niaki, and J. Aghaei, “Overview of subsynchronous resonance analysis and control in wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 234–243, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.025.
- [25] V. B. Virulkar and G. V. Gotmare, “Sub-synchronous resonance in series compensated wind farm: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1010–1029, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.012.
- [26] I. B. M. Matsuo, F. Salehi, L. Zhao, Y. Zhou, and W. J. Lee, “Optimized Frequency Scanning of Nonlinear Devices Applied to Subsynchronous Resonance Screening,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 3, pp. 2281–2291, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2971434.
- [27] M. Jaramillo and L. Tipan, “Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement,” in *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GUCON 2020*, Oct. 2020, pp. 261–267, doi: 10.1109/GUCON48875.2020.9231191.
- [28] R. Tecnolog, “Revista Tecnología e Innovación Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo Revista Tecnología e Innovación una carga puramente resistiva de 1KW . Como se,” vol. 3, no. 9, pp. 76–84, 2016.
- [29] C. J. Hernández Carimán, “Conversor Fuente De Voltaje De 4-Piernas Aplicado a Sistemas De Distribución De 4-Hilos,” p. 136, 2016.
- [30] C. D. E. I. Eléctrica, “Diseño de un filtro trifásico multinivel de dos etapas para la industria en Cuenca,” 2012.
- [31] “Resources | PES Test Feeder.” <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/> (accessed Jul. 01, 2021).

## 7 Anexos

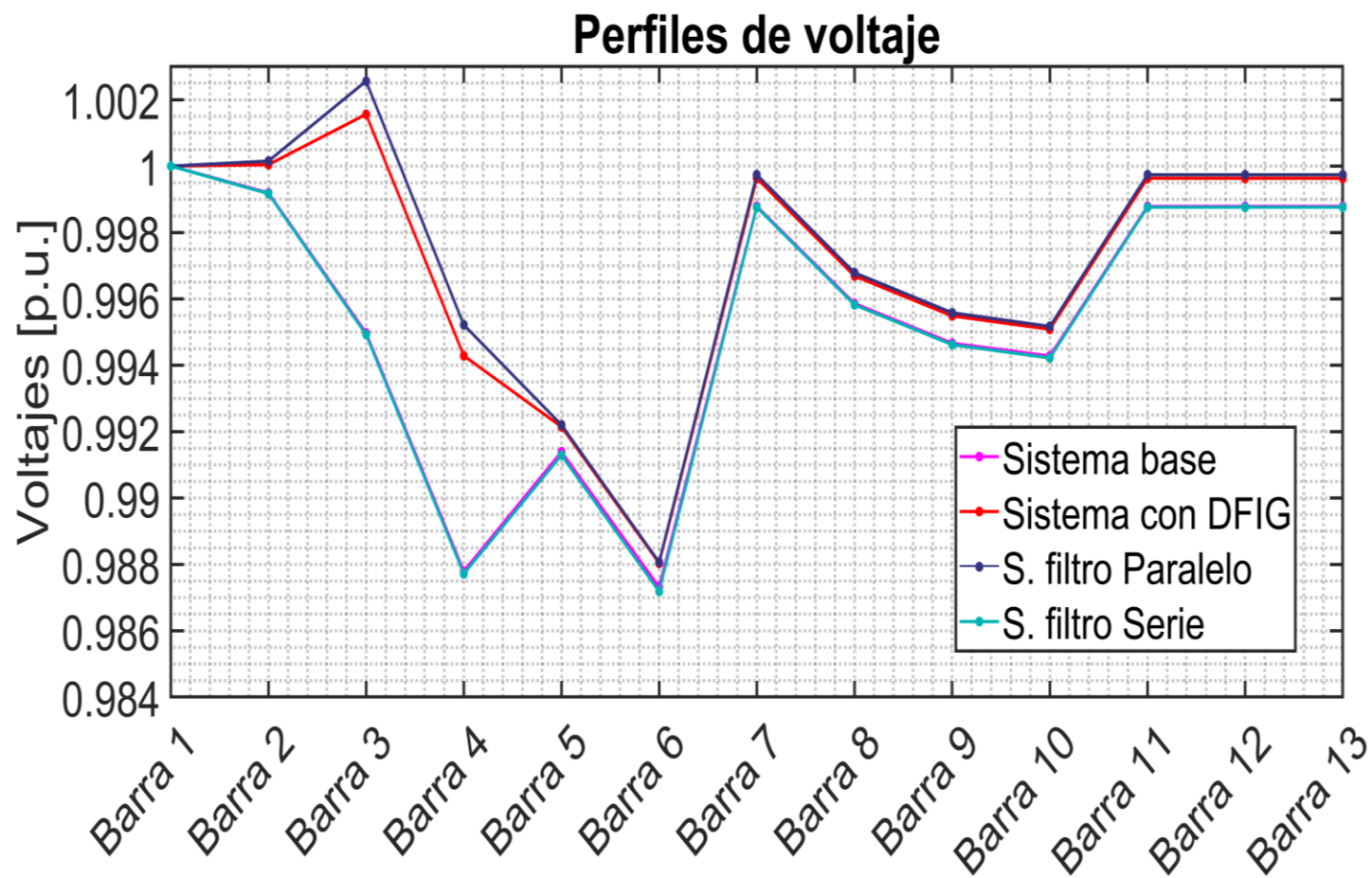


Figura 26. Perfiles de voltajes con los diferentes esquemas del filtro.

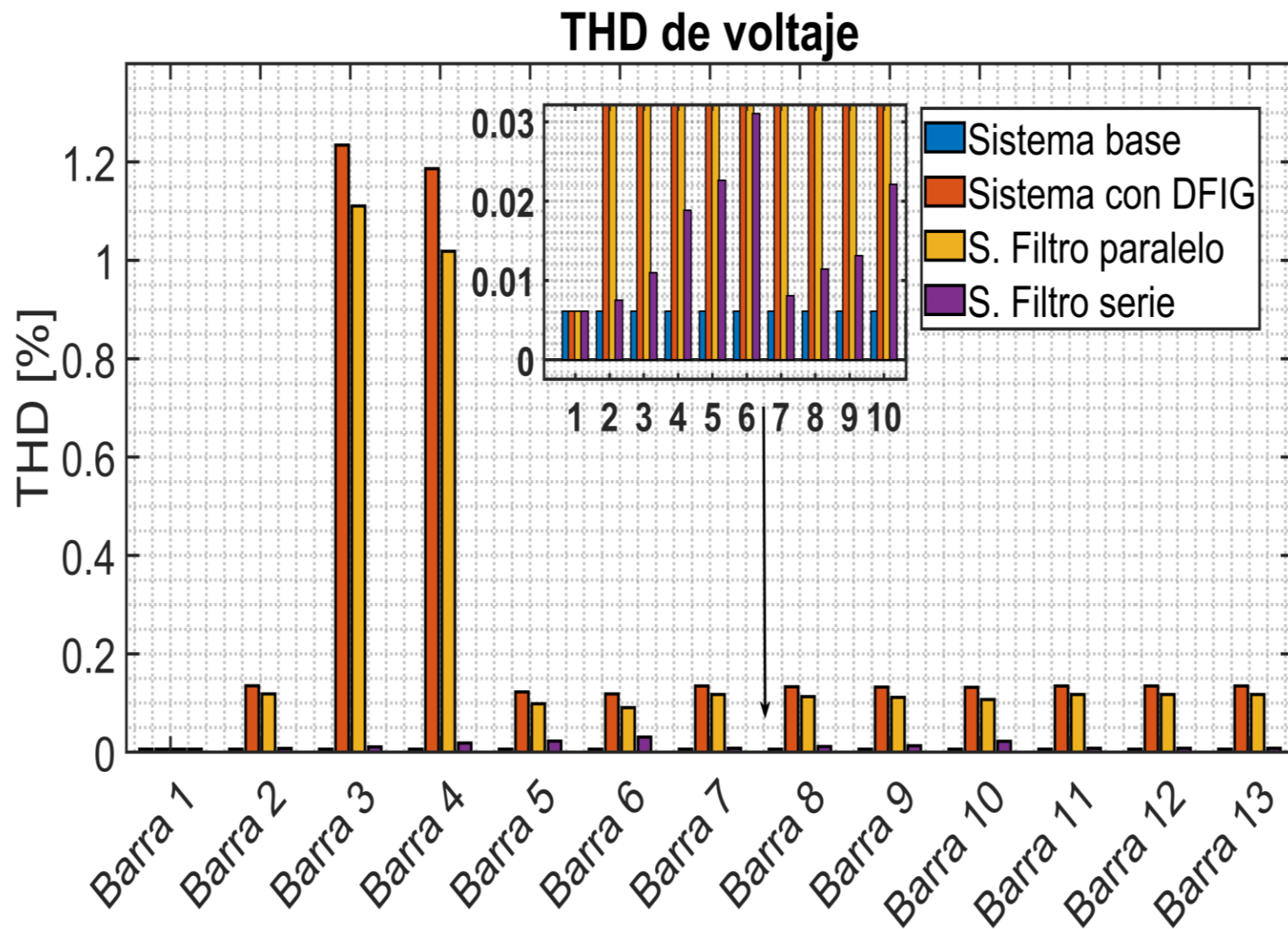


Figura 27. THD de voltaje por cada barra del sistema con los diferentes diseños de filtro.

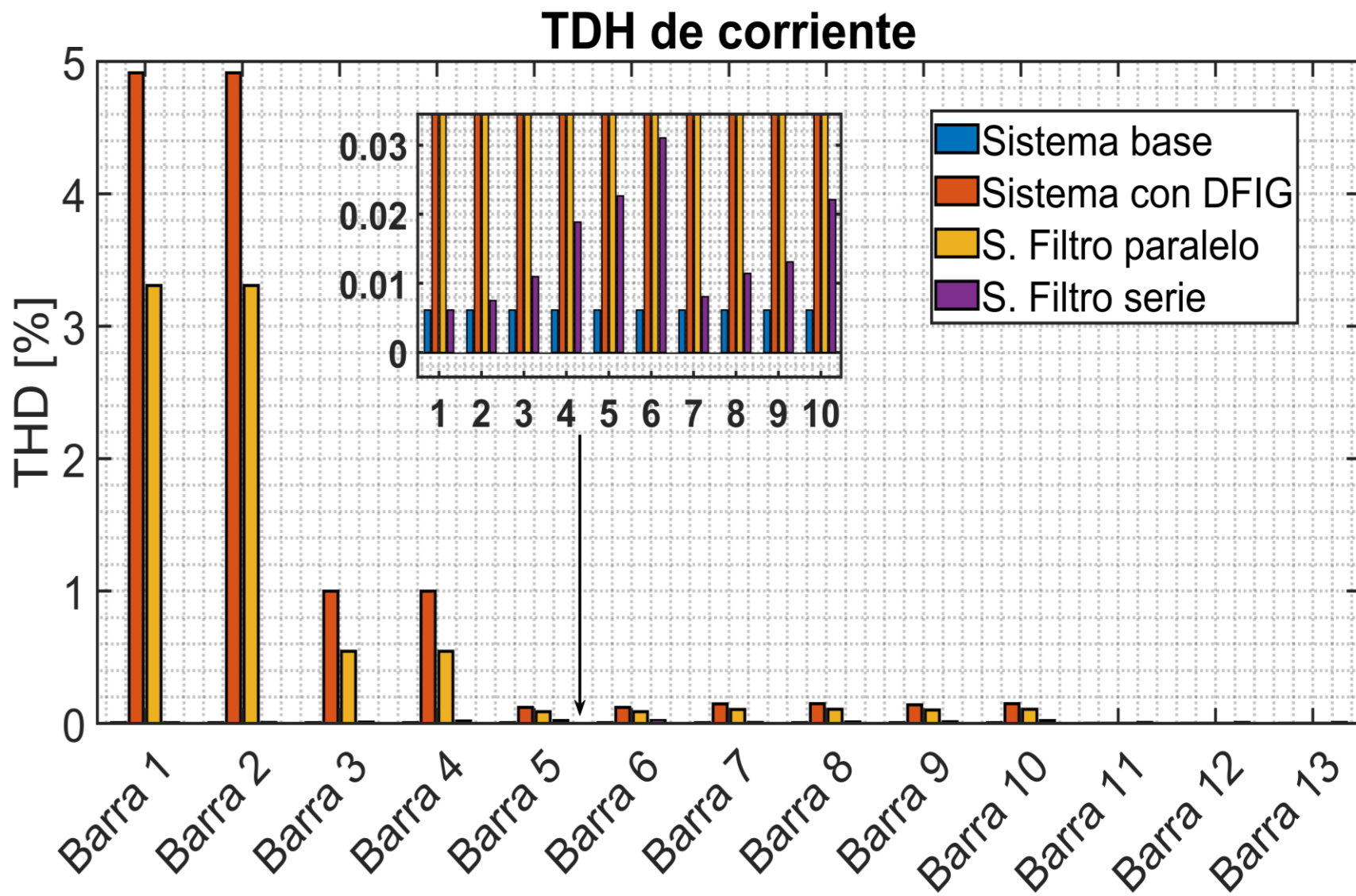


Figura 28. THD de corriente por cada barra del sistema con los diferentes diseños de filtro.

## 8 Estado del arte

DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE EN UN AEROGENERADOR DOBLEMENTE ALIMENTADO PARA LA REDUCCIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA.																			
	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	MICRO-RED (MR)	GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO	RESONANCIA SUB-SÍNCRONA	FILTRO ACTIVO	CALIDAD DE ENERGIA	CAPACIDAD DE GENERACION	DEMANDA ELECTRICA	CONFIGURACIÓN DE LA MR	GENERACIÓN EÓLICA	TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD)	IMPLEMENTACION DE FILTRO ACTIVO	IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE PULSO	SIMULACIÓN DE LA MR	INCORPORACION DE GENERACION EOLICA	ANÁLISIS DE PERFILES DE CORRIENTE	ESTABILIDAD AL SISTEMA
1	2021	Indicadores de los ODS.	✗					✗	✗	✗		✗							
2	2021	About us   Global Wind Energy Council.	✗		✗			✗	✗			✗					✗		
3	2011	Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia.	✗		✗							✗					✗		
4	2011	Fault location and classification in distribution systems using clark transformation and neural network	✗	✗				✗		✗									✗
5	2019	Dynamics and Control of Electric Transmission and Microgrids.	✗	✗	✗			✗	✗		✗	✗			✗				✗

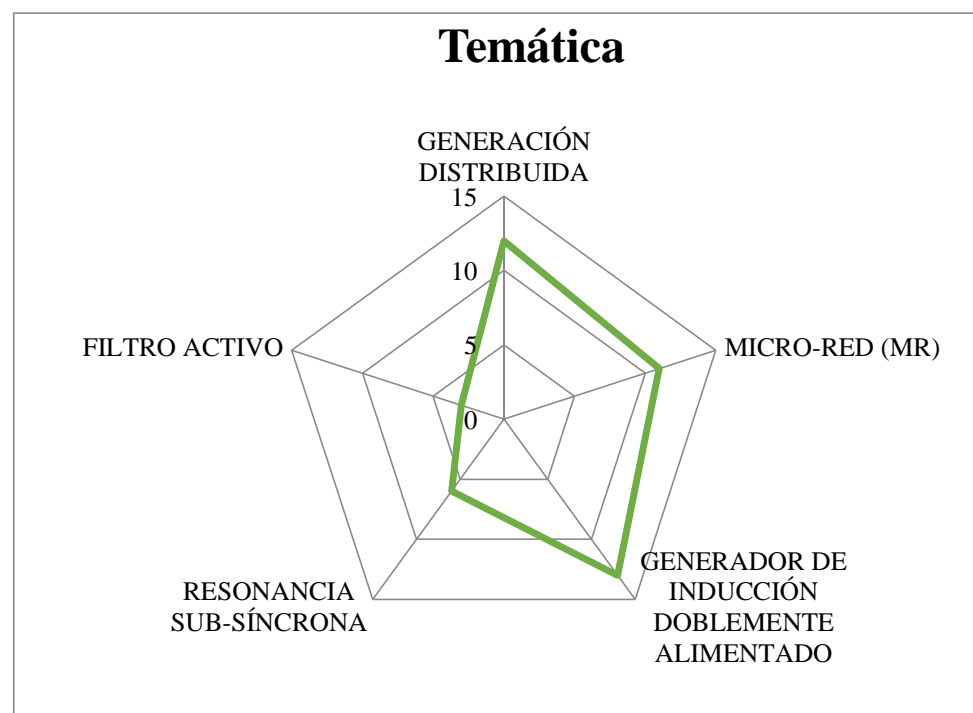


6	2020	Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida en sistemas de distribución utilizando técnicas heurísticas basadas en escenarios de demanda.	✕	✕				✕		✕	✕					✕			✕
7	2015	Confirming the permissible capacity of distributed generation for grid-connected distribution feeders.	✕	✕				✕	✕	✕						✕		✕	✕
8	2019	Incorporating unbalanced operation constraints of three-phase distributed generation.	✕																
9	2018	Fault current limiter placement to reduce recloser-fuse miscoordination in electric distribution systems with distributed generation using multiobjective particle swarm optimization.	✕								✕								
10	2015	System Operation and Energy Management of a Renewable Energy-Based DC Micro-Grid for High Penetration Depth Application.	✕	✕	✕						✕						✕		
11	2018	Role of Outage Management Strategy in Reliability Performance of Multi-Microgrid Distribution Systems.		✕						✕									
12	2018	Digital real-time harmonic estimator for power converters in future micro-grids.		✕				✕					✕					✕	✕

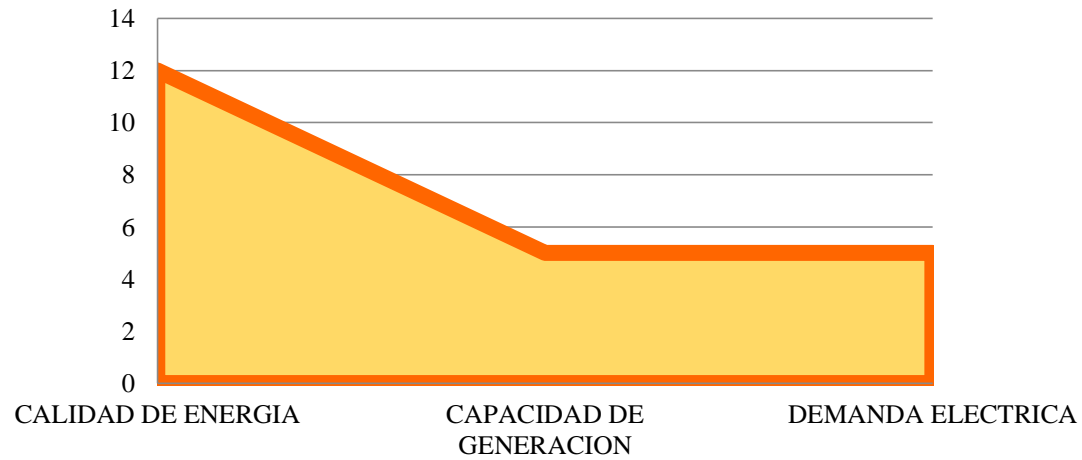
13	2015	100 kJ/50 kW HTS SMES for Micro-Grid.	✗	✗													✗		
14	2011	Hierarchical control of droop-controlled AC and DC micro grids - A general approach toward standardization.	✗	✗				✗								✗	✗	✗	✗
15	2020	Analyzing low voltage ride through capability of doubly fed induction generator based wind turbine.		✗	✗			✗	✗			✗	✗				✗	✗	✗
16	2020	Magnetizing current based improved rotor position and speed estimation of doubly-fed induction generator using model reference adaptive scheme.			✗							✗					✗		
17	2019	Effect of doubly fed induction generator on transient stability analysis under fault conditions.			✗							✗							
18	2020	Effective location of SMES for power fluctuation mitigation of grid connected doubly fed induction generator.			✗			✗				✗							✗
19	2019	Vector control of a doubly fed induction generator wind turbine			✗							✗							
20	2020	Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine.			✗			✗				✗	✗						✗

21	2021	Improved identification method of doubly-fed induction generator based on trajectory sensitivity analysis.			✖			✖				✖	✖						✖
22	2017	Characteristic Analysis of Subsynchronous Resonance in Practical Wind Farms Connected to Series-Compensated Transmissions.				✖							✖					✖	
23	2016	Subsynchronous Resonance in Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Farms.			✖	✖					✖								✖
24	2013	Overview of subsynchronous resonance analysis and control in wind turbines.				✖													
25	2016	Sub-synchronous resonance in series compensated wind farm.			✖	✖							✖						✖
26	2020	Optimized Frequency Scanning of Nonlinear Devices Applied to Subsynchronous Resonance Screening.				✖							✖					✖	
27	2020	Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement		✖		✖							✖						
28	2016	Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo.					✖							✖	✖				✖

29	2016	Conversor Fuente De Voltaje De 4-Piernas Aplicado a Sistemas De Distribución De 4-Hilos.					✕							✕	✕				✕
30	2016	Diseño de un filtro trifásico multinivel de dos etapas para la industria en Cuenca.					✕							✕	✕				
31	2021	Resources   PES Test Feeder								✕	✕					✕			
			12	11	13	6	3	12	5	5	5	13	7	3	3	4	6	7	14



## Formulación del Problema



## Solución propuesta

